

直交電磁場中の弱電離プラズマの不安定性

著者	斎藤 進
号	111
発行年	1966
URL	http://hdl.handle.net/10097/8839

氏 名 (本 籍)	斎 藤 進 (神 奈 川 県)
学 位 の 種 類	工 学 博 士
学 位 記 番 号	工 博 第 1 1 1 号
学 位 授 与 年 月 日	昭 和 4 2 年 3 月 2 4 日
学 位 授 与 の 要 件	学 位 規 則 第 5 条 第 1 項 該 当
研 究 科 専 門 課 程	東 北 大 学 大 学 院 工 学 研 究 科 (博 士 課 程) 電 子 工 学 専 攻
学 位 論 文 題 目	直 交 電 磁 場 中 の 弱 電 離 プ ラ ズ マ の 不 安 定 性

(主 査)

論 文 審 査 委 員	教 授 八 田 吉 典 教 授 長 尾 重 夫 教 授 柴 田 幸 男 助 教 授 佐 藤 益 美
-------------	--

論 文 内 容 要 旨

序 文

本論文は、電場と直交する磁場中の気体弱電離プラズマの不安定性について実験的及び理論的研究を行ったものである。従来この種の実験は Penning Type Discharge によるプラズマを用い比較的強磁場の場合が主として行われてきたが、この場合にはプラズマが非常に不安定で精密な実験は行い難い。本研究では、同軸円筒型放電管を用い、非常に静かな暗プラズマをつくり従来殆ど行われていない弱磁場の場合の不安定性について研究した点に特徴がある。以下その大要を記す。

第一章 直交電磁場中弱電離プラズマの低周波振動現象の観測

第一節 緒 言

第二節 使用放電管の構造・実験用プラズマの生成

図1に放電管の電極構造を示す。格子は浮動である。放電モードはアノード・グローモードで陽極-格子間には陽極グローが存在し、ここで電離が起る。陰極-格子間には暗プラズマが存在する。

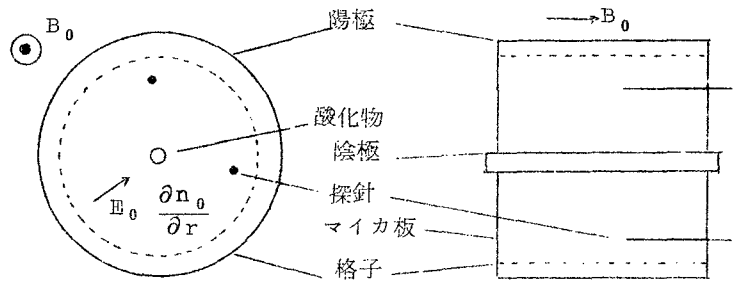


図1

第三節 実験用プラズマの性質

暗プラズマの電子密度、電子温度、空間電位等の管内分布及び放電電流による変化を測定し、半径方向に定常電場及び密度勾配が存在することを示した。

第四節 実験用プラズマに対する直交磁場の効果

放電管の軸方向に外部磁場 (B_0) を加えたときの暗プラズマ中の諸量の変化及びプラズマ中の振動について述べた。特に、 B_0 が $\omega_{ce}/\nu_{en} \simeq 1$ 程度になると $\vec{E}_0 \times \vec{B}_0$ 方向に伝わる低周波振動が発生する。(但し、 ω_{ce} : 電子サイクロトロン周波数、 ν_{en} : 電子-中性粒子間衝突周波数、 E_0 : 半径方向電場) この振動は暗プラズマ中の電子の $\vec{E} \times \vec{B}$ ドリフト速度によって励起されると考えられ、以下この現象に注目して実験する。又、 $\omega_{ce}/\nu_{en} \simeq 1$ 程度の磁場では、イオンの磁場の影響は無視できる。

第五節 弱磁場による低周波振動の観測

前節の低周波振動の性質を詳しく調べた。振動周波数は数100 c/s から数10 kc/s の

範囲にあり、これは、放電々流・磁場・電極寸法・封入ガス圧・回転方向振動モード等によって定まる。更に、振動振巾の管内分布を測定した。

第六節 弱磁場による低周波振動の過渡特性

不安定現象の解明には、不安定の減衰又は成長過程の把握が重要である。それ故に、本節では、前節に示した振動の過渡特性を実験的に測定した。方法は、① 安定領域の磁場のとき、格子にインパルスを加えると、暗プラズマ中に減衰振動が励起される。② 安定領域から不安定領域に（又は逆方向に）磁場を急激に変化させ、そのときの不安定現象の追従を観測する。これらの結果から不安定の時間的減衰又は増大率（ γ ）が観定できる。このようにして求めた γ の磁場及び封入ガス圧、更には放電々流の依存性を示す。

第七節 冷陰極放電管による不安定性の実験

前節までと異り、同軸円筒二極冷陰極放電管で、比較的磁場の値が大（4000 Gaussまで）の場合の不安定性について実験した結果を示す。特に、電極の極性効果についても調べた。

第二章 直交電磁場中の弱電離プラズマの不安定性に対する理論的考察

第一節 緒 言

本章では、前章の不安定現象の実験に対応して、磁場は電子のみに作用しイオンには殆ど影響ないと考えられる弱磁場中で、しかもこれと直角方向に定常電場及び密度勾配が存在する弱電離プラズマの低周波不安定性について理論的に検討する。

第二節 不安定現象の物理的説明

電子とイオンに対する磁場の影響の相違から磁場を横切る $\vec{E} \times \vec{B}$ ドリフト速度に両者の間で相違を生じる。これに基づく二つの不安定性の機構が考えられる。

- ① イオン—中性粒子間の衝突の影響が比較的少で、イオンの慣性の影響大のときは、電子—イオンによる二流体不安定性
- ② 一方、イオンの衝突の影響が大で、慣性の効果が無視できる場合プラズマの不均一性及びイオンのresistivityに基づく不安定性があり、これらの物理的意味を示した。

第三節 基礎方程式及び分散関係の導入

簡単のために直角座標系を用いた。外場の方向は、 z 方向に均一磁場 B_0 ， x 方向に電場 E_0 及び密度勾配 $\frac{\partial n_0(x)}{\partial x}$ をとり、 y 及び z 方向に伝わる波を考える。流体モデルを用いると基礎方程式は

$$-\frac{\partial}{\partial t}n + \nabla \cdot (n\vec{v}_0) = 0, \quad \frac{\partial}{\partial t}n + \nabla \cdot (n\vec{v}_i) = 0,$$

$$0 = -en \left(\vec{E} + \frac{1}{c} \vec{v}_0 \times \vec{B}_0 \right) - \kappa T_e \nabla n - nm_e \nu_{en} \vec{v}_e,$$

$$nm_i \frac{d}{dt} \vec{v}_i = en \left(\vec{E} + \frac{1}{c} \vec{v}_i \times \vec{B}_0 \right) - \kappa T_i \nabla n - nm_i \nu_{in} \vec{v}_i,$$

$$\vec{E} = -\nabla \phi,$$

ここで添字“ e ”，“ i ”はそれぞれ電子及びイオンに関する量を示し、又、 n ：密度、 m ：質量
 v ：速度、 T ：温度、 ν ：中性粒子との衝突周波数、 κ ：ボルツマン定数、 c ：光速、 ϕ ：電気
ポテンシャル、 e ：電荷量とする。これらの式を一次の微少量に対して線型化し、又、 ϕ_1 、
 $n_1/n_0 \propto \exp j(\omega t - k_y y - k_z z)$ （但し、 ω ：振動の角周波数、 k_y 、 k_z はそれぞ
れ y 及び z 方向の波数）を仮定し、分散関係を導入した。

第四節 不安定性に対する弱磁場の効果

本節では、イオンに対する磁場の影響が無視できるような場合の不安定性を検討する。このとき
の分散関係は、

$$\omega^2 - j\nu_{in}\omega - \left(c_i^2 + \frac{m_e}{m_i} c_e^2 \right) k^2 - j(\omega - k_y v_{ey}^0) \nu_{en}^* \left(1 + \frac{\omega_{ce}^2 k_z^2}{\nu_{en}^2 k^2} + j \frac{k_y}{k^2} \frac{\omega_{ce}}{\nu_{en}} \frac{1}{n_0} \frac{\alpha_{n_0}}{\alpha_x} \right) = 0 \quad (2-1)$$

ここで

$$\nu_{en}^* = \frac{m_e}{m_i} \nu_{en} \left(1 + \frac{\omega_{ce}^2}{\nu_{en}^2} \right) / \left\{ \left(1 + \frac{\omega_{ce}^2 k_z^2}{\nu_{en}^2 k^2} \right) + \left(\frac{k_y}{k^2} \frac{\omega_{ce}}{\nu_{en}} \frac{1}{n_0} \frac{\alpha_{n_0}}{\alpha_x} \right)^2 \right\}$$

$$k^2 = k_y^2 + k_z^2, \quad c^2 = \frac{\kappa T}{m}, \quad v_{ey}^0 = y \text{ 方向の電子の定常速度}$$

(2-1)式に於て、 $\omega = \omega_r + j\gamma$ とすると ω_r , γ を分離して求めることができる。 ω_r から振動周波数が定まり、 γ から不安定・安定の判別ができる。 $\gamma > 0$ で安定であり、 $\gamma < 0$ で不安定である。更に(2-1)式を基にして特別な場合についての ω_r 又は不安定条件の吟味を行った。

第五節 イオンに対する磁場の効果の影響

本節では、イオンに対する磁場の影響を衝突周波数に対する一次の効果として導入し、不安定性への影響を検討した。これによれば、イオンに対して全く磁場を考えない場合よりも不安定性になり易いことが示された。

第三章 実験と理論との比較及び検討

第一節 緒 言

第一章に示した実験結果を前章での理論的結果と比較を行う。この場合、前章での直角座標系に対して、 z 方向が実験で用いた放電管の軸方向に、 x 方向が径方向に、 y 方向が回転方向に対応させた。

第二節 弱磁場に於ける振動周波数の検討

前章(2-1)式より、 $\omega_r \ll \nu_{in}$ の場合には、 ω_r は次のようになる。

$$\omega_r \approx \frac{\nu_{en} \left(1 + \frac{\omega_{ce}^2}{\nu_{en}^2} \frac{k_z^2}{k^2} \right)}{\nu_{in} + \nu_{en} \left(1 + \frac{\omega_{ce}^2}{\nu_{en}^2} \frac{k_z^2}{k^2} \right)} k_y v_{ey}^0$$

又、 $\omega_r \geq \nu_{in}$ のときには

$$\omega_r \div \pm \sqrt{\frac{\left(C_i^2 + \frac{m_e}{m_i} C_e^2 \right) k^2 - \left(\frac{1}{2} \nu_{in} \right)^2 + \sqrt{\left\{ \left(C_i^2 + \frac{m_e}{m_i} C_e^2 \right) k^2 - \left(\frac{1}{2} \nu_{in} \right)^2 \right\}^2 + \frac{\left(\frac{m_e}{m_i} \nu_{en} \left(1 + \frac{\omega_{ce}^2}{\nu_{en}^2} \right) k_y v_{ey}^0 \right)^2}}{2}}$$

となり、この式によって第一章第五節の実験結果は良く説明できる。

第三節 不安定の時間的減衰及び増大定数について

前章(2-1)式より、 r を求めると、 $\omega_r \ll \nu_{in}$ のときには、

$$r = \frac{\left(C_i^2 + \frac{m_e}{m_i} C_e^2 \right) k^2 + k_y v_{ey} \nu_{en} \frac{k_y}{k^2} \frac{\omega_{ce}}{\nu_{en}} \frac{1}{n_0} \frac{\alpha_{n0}}{\alpha_x}}{\nu_{in} + \nu_{en} \left(1 + \frac{\omega_{ce}^2}{\nu_{en}^2} \frac{k_z^2}{k^2} \right)}$$

となり、第一章第六節の実験結果は、この式によって定性的にも数値的にも説明できる。又 $\omega_r \geq \nu_{in}$ の場合の検討も行った。

第四節 磁場のイオンに対する影響と冷陰極放電管に於ける実験結果の検討

第一章第七節での実験結果に対して前章第五節の結果による説明の可能性を検討した。

第四章 総括及び謝辞

直交電磁場中の弱電離プラズマの不安定性について、格子つき熱陰極放電管を用いて実験を行い、又理論的な解析を行った。実験で得られた不安定の振動周波数及び時間的減衰及び増大率は、理論的に導入された結果と良い一致を見た。

終りに、本研究を行うにあたり懇切に御指導下さった教授八田吉典先生に心から感謝の意を表します。

審 査 結 果 の 要 旨

弱電離プラズマ中では中性分子の存在のためにプラズマ中の波動や不安定性を減衰させる力のはたらくが、磁場を加えるとその影響が電子とイオンに対して等しくないために両者の運動の間に「ずれ」を生じ、このために増大波や不安定性が発生することがある。このような現象は核融合制御のためのプラズマの「とじこめ」と重要な関連があるばかりでなく、気体電子工学の新しい発展の可能性を示唆するものとしても興味深い。

このような不安定性の内、磁場の方向の電流によるものは、いわゆるらせん状不安定性 (helical instability) として比較的よく研究されているが、磁場に直角を向きの電流による不安定性は、現象が極めて複雑なために不明確な点が少なくない。本論文はこの問題を取り上げ、明確で再現性のよい多くの実験を行ない、その結果を理論計算と対比させて充分よい一致を得られることを示したもので、序文と4章より成る。

第1章は著者の行なった実験について述べている。本実験の特徴はプラズマとして暗プラズマを用い、磁場は電子のサイクロトロン周波数が衝突周波数と同程度であるような比較的弱い磁場を用いている点であって、その結果、充分理論計算との比較にたえるような再現性のよい実験結果を得ることに成功している。特に不安定性をしめす波の増大率の測定を行なっていることは高く評価することができる。

第2章では2流体モデルの基本式を用いて前記の不安定性の解析を行なっている。ここで著者はいわゆる two beams 型の不安定性の外に密度勾配とイオンと中性分子との衝突とによっておこる不安定性があることを明らかにしている。

第3章は実験と理論との比較であって複素角周波数の実数部と虚数部の双方についてそれを行っているが特に後者において、実験と理論との非常によい一致を得ている点は重要な知見である。第4章は結論と謝辞である。

以上本論文は不明確な点が極めて多かつた直交電磁場中の弱電離プラズマの不安定性について著者独自の実験的手法によって多くの明快な実験結果を得、かつその理論的説明に成功して多くの知見を得たものであってプラズマ工学および気体電子工学上、寄与するところが少なくない。よって本論文は工学博士の学位論文として合格とみとめる。